

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Sašo Nikolovski**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Mentori:

Doc. dr. sc. Tomislav Staroveški

Student:

Sašo Nikolovski

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru, Doc. dr. sc. Tomislavu Staroveškom, na ukazanom povjerenju, savjetima i pomoći tijekom izrade završnog rada.

Također se zahvaljujem djelatnicima tvrtke Kontal d.o.o. na pomoći pri izradi uzoraka za eksperimentalni dio završnog rada.

Od srca zahvaljujem svojoj obitelji na potpori i razumijevanju tijekom cijelog mog školovanja.

Sašo Nikolovski



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

**Sašo Nikolovski**

Mat. br.: 0035195721

Naslov rada na

hrvatskom jeziku:

**Kvaliteta obrade pri rezanju laserom**

Naslov rada na

engleskom jeziku:

**Machining Quality at Laser Cutting**

Opis zadatka:

Rezanje laserom jedan je od najčešće korištenih i najekonomičnijih postupaka koji se primjenjuje za rezanje različitih vrsta metalnih i nemetalnih materijala. Međutim, kvaliteta dobivenog reza uvelike ovisi o izboru odgovarajućih parametara obrade.

U radu je potrebno:

1. Opisati najčešće izvedbe industrijskih lasera koji se koriste za rezanje,
2. Navesti i objasniti parametre obrade koji imaju značajniji utjecaj na kvalitetu reza,
3. Na dostupnom CNC stroju za lasersko rezanje ispitati utjecaj posmaka i snage lasera na kvalitetu reza, na čeličnim limovima debljine 2mm,
4. Dati zaključke rada.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

**1. rok:** 23. veljače 2018.

**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2018.

**3. rok:** 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

**1. rok:** 26.2. - 2.3. 2018.

**2. rok (izvanredni):** 2.7. 2018.

**3. rok:** 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Tomislav Staroveški

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
SAŽETAK.....	IV
SUMMARY .....	V
1. UVOD.....	1
2. LASERSKO REZANJE .....	2
2.1. Lasersko rezanje taljenjem.....	3
2.2. Lasersko rezanje izgaranjem.....	4
2.3. Lasersko rezanje isparavanjem .....	5
3. IZVEDBE CNC STROJEVA ZA LASERSKO REZANJE.....	6
3.1. Osnovne komponente CNC stroja za obradu laserom .....	6
3.2. Laseri s plinovitim medijem .....	8
3.2.1. CO <sub>2</sub> laser .....	8
3.3. Laser s krutim medijem.....	9
3.3.1. Nd:YAG laser .....	9
3.3.2. Disk laser .....	11
3.3.3. Fiber laser.....	13
4. PARAMETRI OBRADE.....	15
4.1. Posmična brzina .....	15
4.2. Kontinuirani ili impulsni režim rada.....	16
4.3. Snaga lasera.....	16
4.4. Žarišna duljina.....	17
4.5. Položaj žarišta u odnosu na površinu radnog komada .....	18
4.6. Tlak i vrsta plina za rezanje .....	19
4.7. Izbor i veličina sapnice .....	20
4.8. Udaljenost sapnice od radnog komada.....	20
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	21
5.1. Oprema za lasersko rezanje.....	21
5.2. Radni materijal.....	22
5.3. Plan pokusa .....	23
5.4. Rezanje konstrukcijskog čelika S235JRG1 CNC strojem za lasersko rezanje.....	25
6. ZAKLJUČAK.....	31
LITERATURA.....	32
PRILOZI.....	33

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Lasersko rezanje [2] .....	2
Slika 2.	Lasersko rezanje taljenjem [2] .....	3
Slika 3.	Lasersko rezanje izgaranjem [2].....	4
Slika 4.	Lasersko rezanje isparavanjem [2] .....	5
Slika 5.	CNC laser „TruLaser 5040“ [4] .....	6
Slika 6.	Laserska glava [6] .....	7
Slika 7.	Rezonator CO <sub>2</sub> lasera [8].....	8
Slika 8.	Izgled CO <sub>2</sub> lasera [8] .....	9
Slika 9.	Konstrukcija Nd:YAG lasera [10].....	10
Slika 10.	Izgled disk lasera [12] .....	12
Slika 11.	Prikaz optičkog vlakna fiber lasera [15].....	13
Slika 12.	Primjer CNC fiber lasera PE-F300-3015 [7].....	14
Slika 13.	Usporedba reznih površina načinjenih kontinuiranim (a) i impulsnim (b) režimom rada [5] .....	16
Slika 14.	Usporedba leća žarišnih duljina f od 2,5 i 5 inča (63,5 i 127 mm) [18].....	17
Slika 15.	Položaj žarišta [17] .....	18
Slika 16.	Utjecaj žarišne udaljenosti na kvalitetu reza [19] .....	19
Slika 17.	„SUPER TURBO-X 48 Mk II“ .....	21
Slika 18.	Uzorak za rezanje .....	23

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Specifikacije stroja „SUPER TURBO-X 48 Mk II“ .....	22
Tablica 2. Kemijski sastav čelika S235JRG1 [21] .....	22
Tablica 3. Mehanička svojstva čelika S235JRG1 [20].....	22
Tablica 4. Parametri rezanja za čelik debljine 1 mm .....	24
Tablica 5. Parametri rezanja za čelik debljine 2 mm .....	24
Tablica 6. Parametri rezanja za čelik debljine 3 mm .....	24
Tablica 7. Parametri rezanja za čelik debljine 4 mm .....	25
Tablica 8. Parametri rezanja za čelik debljine 5 mm .....	25
Tablica 9. Prikaz reznih površina čelika debljine 1 mm .....	26
Tablica 10. Prikaz reznih površina čelika debljine 2 mm .....	27
Tablica 11. Prikaz reznih površina čelika debljine 3 mm .....	28
Tablica 12. Prikaz reznih površina čelika debljine 4 mm .....	29
Tablica 13. Prikaz reznih površina čelika debljine 5 mm .....	30

## SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je kvaliteta obrade pri rezanju laserom. U uvodnom dijelu opisan je proces laserskog rezanja te njegove varijante. U nastavku je prikazana podjela CNC strojeva za lasersko rezanje koja se temelji na vrsti aktivnog medija te je za svaku izvedbu opisan princip rada stroja. Zatim su obrađeni parametri laserskog rezanja te njihov utjecaj na kvalitetu reza. Eksperimentalni dio rada proveden je u Karlovcu u tvrtki Kontal d.o.o. gdje su izrezani uzorci od općeg konstrukcijskog čelika. Pomoću CO<sub>2</sub> lasera SUPER TURBO-X 48 rezani su uzorci debljine 1, 2, 3, 4 i 5 mm, različitim parametrima obrade. Kvantifikacija uzoraka temeljila se na kvaliteti obrađene površine dobivene pri korištenju različitih posmičnih brzina i snaga lasera. Analizom rezultata utvrđeni su parametri kojima se ostvaruje najbolja kvaliteta reza.

Ključne riječi: Laser, CO<sub>2</sub>, rezanje, brzina, snaga, kvaliteta



## **SUMMARY**

This paper describes laser cutting process and its variants. Specific characteristics of laser cutting CNC machines are described and classified with respect to the different laser types. Principles of operation for each specific laser type are also described. The laser cutting parameters and their impact on the quality of the cut have also been described. The experimental part of the work was done in Karlovac at Kontal d.o.o. where samples of non-alloy structural steel were cut. Samples with thickness 1, 2, 3, 4 and 5 mm were cut using CO<sub>2</sub> laser SUPER TURBO-X 48 with using different cutting parameters. Quantification of the samples was based on the quality of the obtained cutting surface. Results indicate the best results were achieved using feedrates in range from 1 to 3 m/min and laser power from 800 to 1300W.

Key words: laser, CO<sub>2</sub>, cutting, speed, power, quality

## 1. UVOD

LASER je akronim od engleskih riječi „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, koji u prijevodu znači pojačavanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja. Laser je svjetlosni oscilator, odnosno generator monokromatske, koherentne i usmjerene svjetlosti. Glavno svojstvo ovakve svjetlosti je mogućnost fokusiranja na točku malog promjera ( $< 1$  mm), što je nemoguće kod prirodne svjetlosti [1].

Prvi prototip obradnog centra s laserskom glavom, snage od oko 2kW, sastavljen je 1970. godine, ali nije bio dovoljno usavršen za serijsku proizvodnju. Laser se uvodi u industrijsku upotrebu 1980. godine i služio je za rezanje lima, a nakon toga i za rezanje nemetalnih materijala te danas postaje sastavni dio suvremene tehnike obrade materijala [2].

Industrijska proizvodnja bilježi porast primjene tehnologije rezanja laserom. Glavne prednosti ove tehnologije mogu se iskoristiti u gotovo svim granama industrije, od mikroelektronike do brodogradnje, poput:

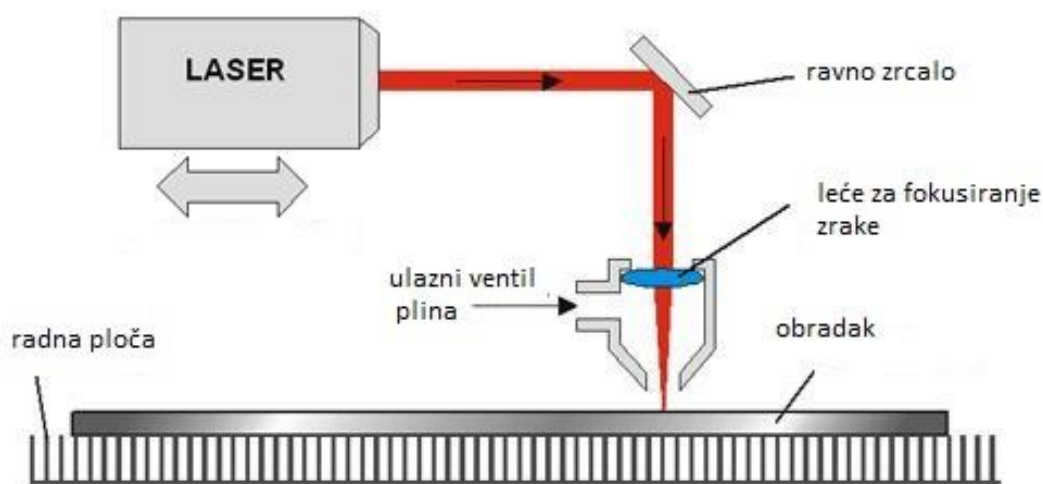
- Visoke gustoće snage odnosno malog unosa topline;
- Uske zone utjecaja topline;
- Malih deformacija radnog komada;
- Velikih posmičnih brzina;
- Visoke kvalitete reza;
- Visoke fleksibilnosti. [2]

Glavni nedostatak tehnologije rezanja laserom, poput visokih investicijskih troškova, može se nadoknaditi velikom proizvodnošću i nepotrebnom naknadnom obradom radnog komada te vrlo visokom kvalitetom reza [1].

Lasersko rezanje može se ostvariti taljenjem, izgaranjem i isparavanjem različitih materijala pomoću fokusirane laserske zrake i aktivnog ili inertnog plina. Taj proces odvija se na CNC strojevima za lasersko rezanje koji se dijele na lasere s plinovitim medijem i lasere s krutim medijem. Međutim, kvaliteta dobivenog reza uvelike ovisi o izboru odgovarajućih parametara obrade [2].

## 2. LASERSKO REZANJE

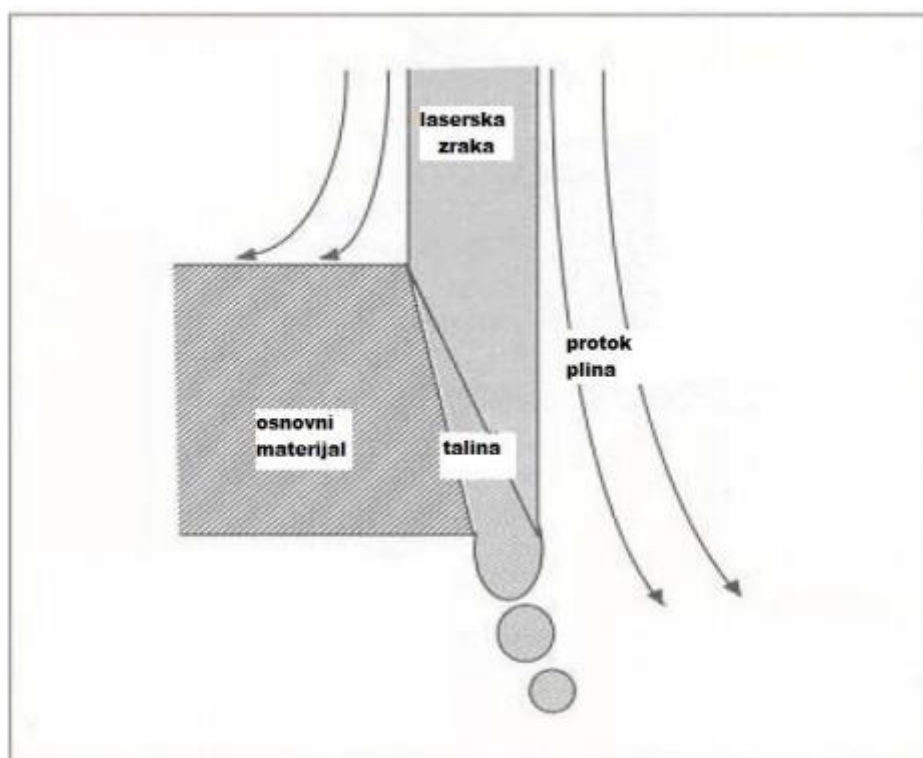
Obrada materijala laserskim rezanjem spada u nekonvencionalne postupke obrade zato što alat nije tvrdi od obratka te nema mehaničkih sila između alata i obratka. Mehanička svojstva obratka poput tvrdoće, čvrstoće i žilavosti ne utječu na proizvodnost obrade, ali zato utječu fizikalna svojstva kao što su električna vodljivost i toplinska vodljivost. Lasersko rezanje može zamijeniti mehaničke tipove obrade poput bušenja i probijanja. Kod rezanja čeličnih i aluminijevskih limova, laser ima prednost nad plazmom zbog uštede energije i preciznijeg rezanja. U jednu od prednosti mogu se ubrojiti i manje strukturne i kemijske promjene na predmetu obrade u odnosu na mehaničke tipove obrade. Iako laser omogućava izradu provrta jako malih promjera te visoku kvalitetu ruba, glavni nedostatak ove obrade je nemogućnost rezanja materijala većih dimenzija. Obrada laserom (Laser Beam Machining – LBM) zasniva se na primjeni koncentrirane fotonske energije, fokusirane na malu površinu materijala, za obradu zagrijavanjem, taljenjem, izgaranjem ili isparavanjem. To je toplinski proces u kojem se koristi kombinacija fokusirane laserske zrake i aktivnog ili inertnog plina kako bi se zagrijala površina obratka te na njoj stvorio zarez. Nakon stvaranja zareza, fokusirana laserska zraka tali materijal, a plin pod tlakom otpuhuje rastaljeni materijal od zareza (slika 1). Po mehanizmu rezanja, lasersko rezanje se dijeli na lasersko rezanje taljenjem (rezanje inertnim plinom), lasersko rezanje izgaranjem i lasersko rezanje isparavanjem [2,3,4,5,6].



Slika 1. Lasersko rezanje [2]

## 2.1. Lasersko rezanje taljenjem

Proces laserskog rezanja taljenjem temelji se na taljenju materijala obratka pomoću laserske zrake, a zatim se rastaljeni materijal otpuhuje mlazom inertnog plina pod visokim tlakom (slika 2). Ovaj princip rezanja zahtijeva manji unos energije nego rezanje isparavanjem. Inertni plin (dušik i/ili argon) također služi kao zaštitna atmosfera od vanjskih nečistoća te štiti lasersku sapnicu. Tlak plina za otpuhivanje uobičajeno iznosi nekoliko bara, ali razvija se i rezanje visokim tlakom od oko 30 bara, kojim se postiže visoka kvaliteta površine reza [1,2,3,6].

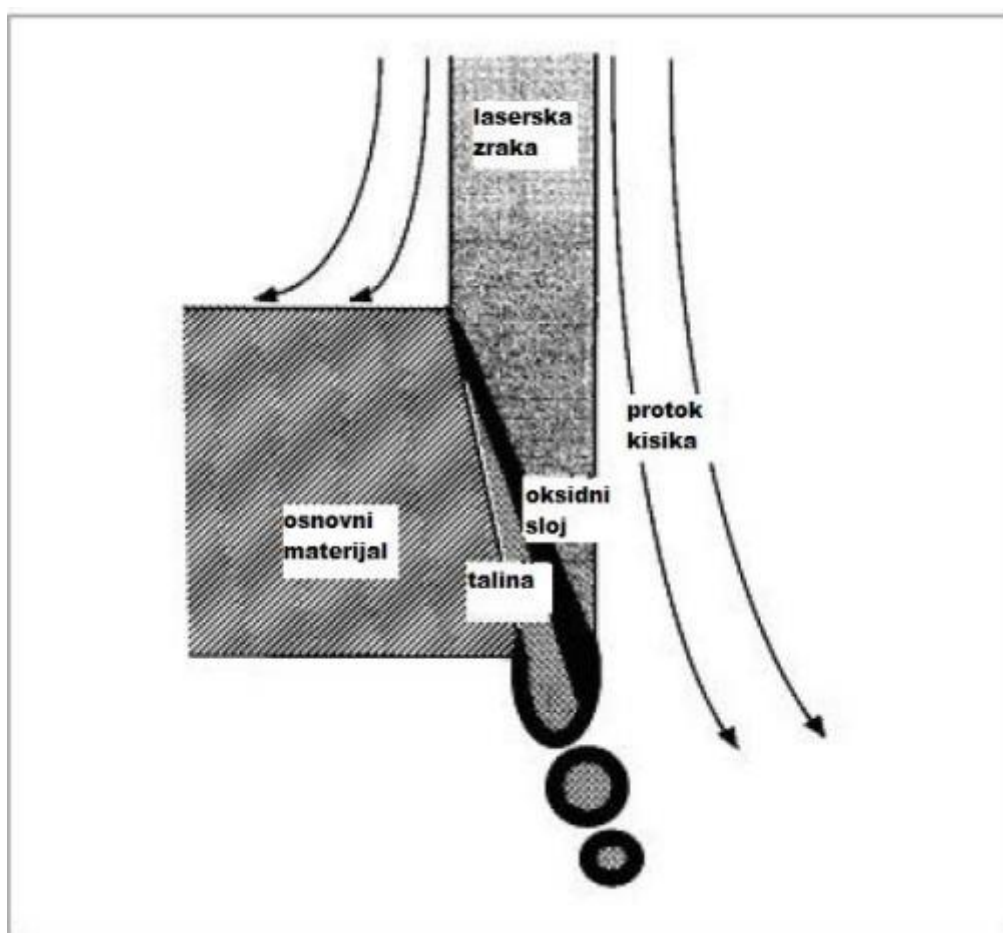


Slika 2. Lasersko rezanje taljenjem [2]

Lasersko rezanje taljenjem je primjenjivo kod svih metala, posebno kod nehrđajućih čelika i drugih visokolegiranih čelika, aluminijskih i titan legura, ali i kod nemetala koji se tale. Dobiveni rez je visoke kvalitete i ima istu otpornost na koroziju kao i osnovni materijal. Posmične brzine su relativno male u usporedbi s postupcima rezanja s aktivnim plinom. Glavni tehnološki problem je pojava srha na rubovima reza, što se sprječava korištenjem inertnog plina pri tlaku većem od 10 bara. [1,2,3,6]

## 2.2. Lasersko rezanje izgaranjem

Kod laserskog rezanja izgaranjem materijal se zagrijava pomoću fokusirane laserske zrake u oksidnoj atmosferi čime se potiče egzotermna oksidacija radnog komada i pomoćnog plina. Egzotermna oksidacija omogućava dodatni unos topline što rezultira većim brzinama rezanja u usporedbi s rezanjem inertnim plinom (lasersko rezanje taljenjem). Laserska zraka uspostavlja i stabilizira izgaranje u rezu, dok pomoćni plin otpuhuje rastaljeni materijal iz zone rezanja te štiti optiku lasera (slika 3). Koristi se za rezanje čelika i nehrđajućeg čelika i po kvaliteti obrade usporedivo je iznimno preciznom plinskom i plazma rezanju. Pomoćni aktivni plin za rezanje je kisik ili mješavina bogata kisikom [1,2,3].



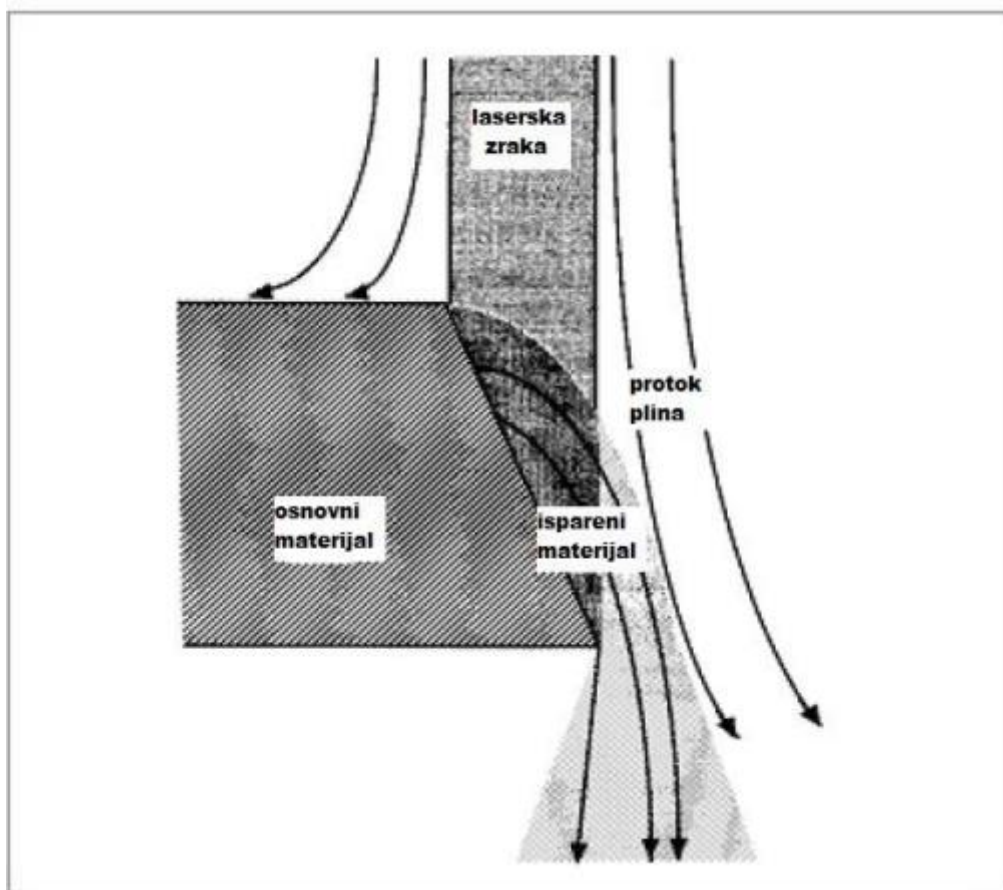
Slika 3. Lasersko rezanje izgaranjem [2]

Površina reza je oksidirana, ali kod konstrukcijskih čelika, taj se sloj oksida lako ukloni. Kod nehrđajućeg čelika troska je viskozija (nikal se teško oksidira), može ostati na donjem rubu reza i teže se uklanjanja [1,2,3].

### 2.3. Lasersko rezanje isparavanjem

Materijal se zagrijava iznad temperature taljenja te u konačnici isparava. Pritom se koristi mlaz plina za otpuhivanje isparenog materijala iz zone rezanja kako bi se izbjegla kondenzacija materijala u već formiranom rezu (slika 4) [2,3].

Lasersko rezanje isparavanjem koristi se za rezanje materijala poput akrila, polimera, drveta, papira, kože i određenih keramičkih materijala. Parametri obrade za proces rezanja navedenih materijala određuje se na temelju termičkih svojstava tih materijala. Za rezanje metala, lasersko rezanje isparavanjem je najsporija metoda između spomenutih, međutim, prikladna je za obradu složenih pozicija s uskim tolerancijskim područjem [2,6].



Slika 4. Lasersko rezanje isparavanjem [2]

### 3. IZVEDBE CNC STROJEVA ZA LASERSKO REZANJE

#### 3.1. Osnovne komponente CNC stroja za obradu laserom

Osnovne komponente prikazane na slici 5 koje većina CNC lasera sadrži su : Izvor laserske svjetlosti s odgovarajućim regulacijskim sustavom, CNC upravljački sustav, sustav za hlađenje, posmični prigoni X, Y i Z osi za kretanje laserske glave, obradni stol i laserska glava.



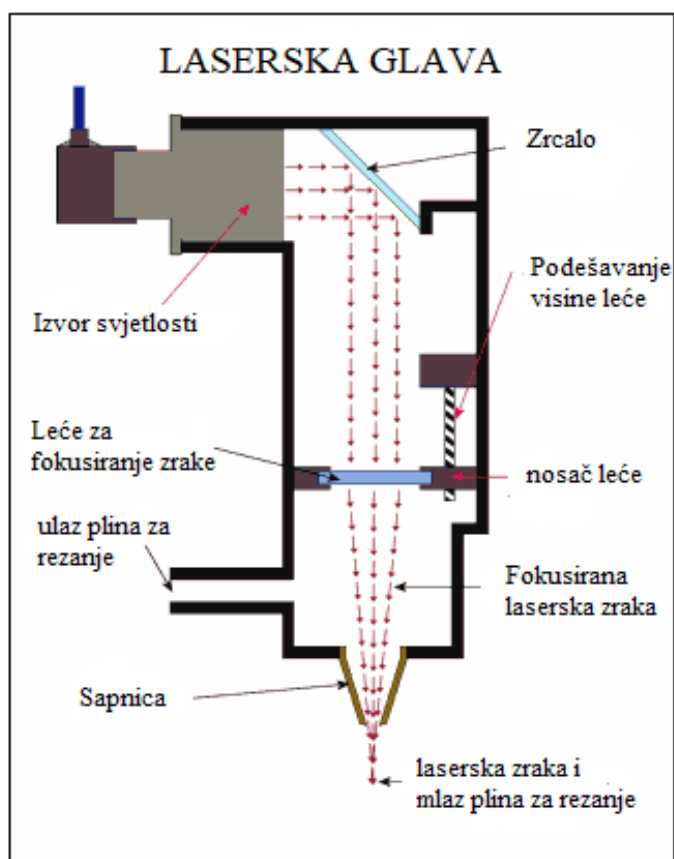
Slika 5. CNC laser „TruLaser 5040“ [4]

CNC upravljački sustav stroja - služi za upravljanje CNC strojem. Upravlja se brzinom obrade i putanjom alata, odabire se izlazna snaga i nul-točka stroja te upravlja uključivanjem/isključivanjem sustava za hlađenje.

Sustav za hlađenje – Ako stroj neprestano radi kroz duži vremenski period, doći će do njegovog zagrijavanja što će utjecati na njegov rad, dugotrajnost i točnost pozicioniranja. Hlađenjem se temperatura stroja održava konstantnom, a laserska zraka stabilnom.

Posmični prigoni X, Y i Z osi – osiguravaju gibanje laserske točke po zadanoj trajektoriji NC programa.

Laserska glava - Laserske zrake se od svog izvora odvođe pomoću optičkog sustava za vođenje do laserske glave koja te zrake fokusira na malu točku obratka (slika 6). Radi zaštite leće od dima i prskanja taline, u lasersku glavu se uvodi pomoćni plin za rezanje (zrak, kisik, dušik ili argon) koji struji ispod leće prema otvoru sapnice. Vrsta tog plina i pritisak pod kojim struji ovise materijalu koji se obrađuje i o složenosti obrade [6].



Slika 6. Laserska glava [6]

Obradni stol - U laserskoj obradi, obradni stol uglavnom je nepomičan, no postoje i radni stolovi koji omogućavaju dodatna kretanja. Obradni stolovi su izvedeni u obliku rešetki ili u obliku ravne ploče s puno rupa i šupljina. Na taj način se tokom laserske obrade omogućava protok zraka ispod obratka te se postiže čišći i učinkovitiji rez na obratku, ali se i smanjuje nastanak naslaga na donjoj strani obratka koje mogu nastati tokom obrade [6].

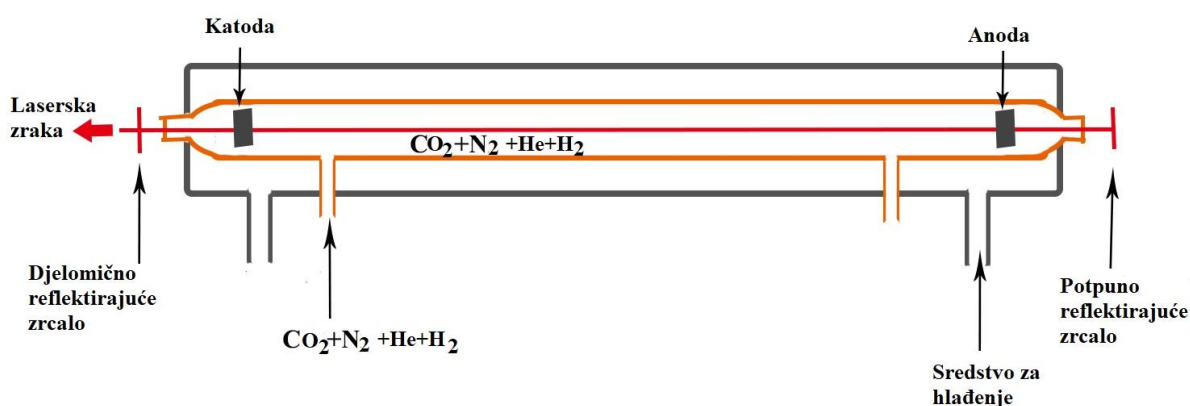


### 3.2. Laseri s plinovitim medijem

#### 3.2.1. CO<sub>2</sub> laser

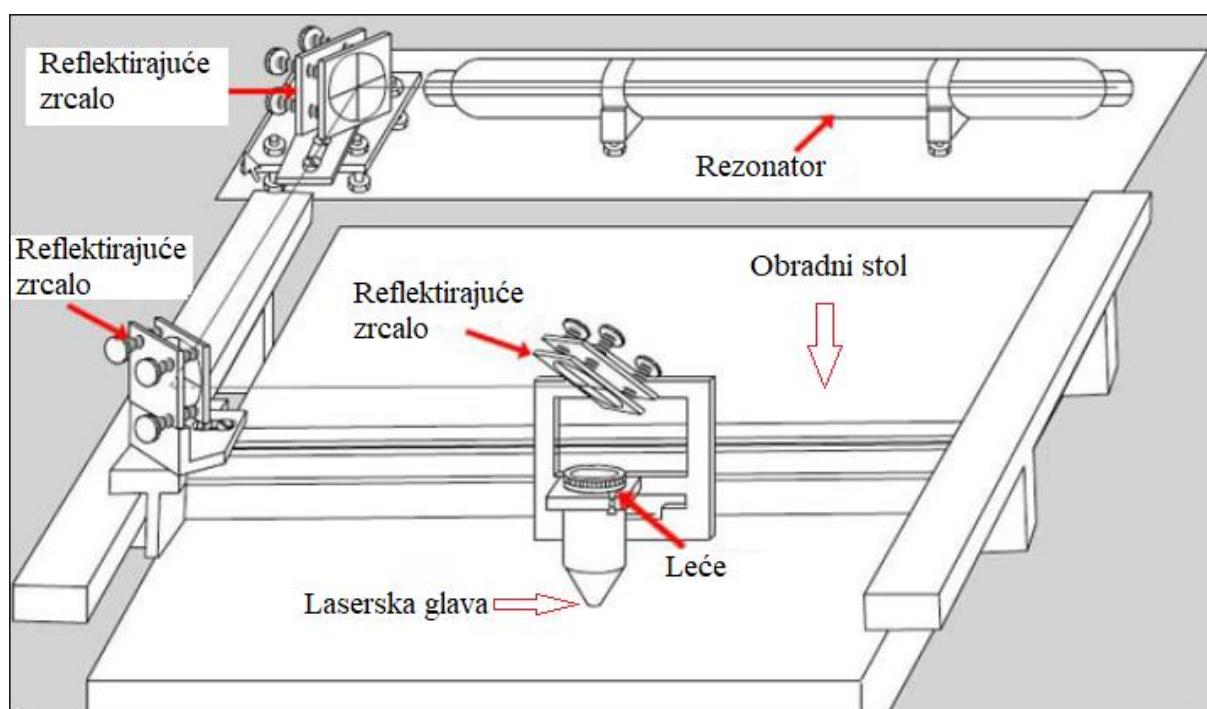
Osnovna komponenta ove vrste lasera je rezonator u obliku cijevi ispunjen mješavinom plinova. Rezonator je prostor između dva zrcala od kojih je jedno potpuno reflektirajuće, a drugo omogućuje prolaz svjetlosti (slika 7). Plinska smjesa općenito se sastoji od ugljičnog dioksida, dušika, vodika, helija i ostalih aditiva. Proizvedena laserska zraka je nevidljiva ljudskom oku i nalazi se u infracrvenom području svjetlosnog spektra [8].

Proces stvaranja laserske zrake započinje kada se molekule dušika u plinskoj mješavini stimuliraju visokim naponom zbog čega postaju uzbuđene, to jest prelaze u više energetska stanje. Dušik se koristi jer može držati to uzbuđeno stanje dulje vrijeme bez ispuštanja energije u obliku fotona ili svjetla. Molekule dušika zatim uzbuđuju molekule CO<sub>2</sub>. Tijekom tog procesa, molekule dušika predaju energiju, sudarom elektrona, molekulama CO<sub>2</sub>. Prijelazom iz višeg u niže energetska stanje pobuđenih molekula CO<sub>2</sub> dolazi do emisije fotona, što u konačnici dovodi do stvaranja laserske zrake. Nakon emisije fotona, molekule CO<sub>2</sub> se sudaraju s atomima helija zbog čega se vraćaju u svoje početno energetska stanje i spremne su za ponovni ciklus. Da bi se taj proces mogao odvijati potreban je tlak 100 – 250 hPa. Višak energije koji ne može biti upotrijebljen za stvaranje laserske zrake se pretvara u toplinu koja se odvodi iz sustava [8].



Slika 7. Rezonator CO<sub>2</sub> lasera [8]

Prolaskom kroz rezonator svjetlost se reflektira od zrcala i vraća u aktivni medij što uzrokuje interferenciju svjetlosnih valova, odnosno algebarsko zbrajanje (pojačavanje) dva ili više vala. Taj proces ponavlja se sve dok intenzitet svjetlosti ne bude dovoljno velik za prolazak kroz djelomično reflektirajuće zrcalo. CO<sub>2</sub> laseri imaju stupanj učinkovitosti čak i do 20% (oko 20% uložene energije se emitira u obliku laserske zrake, što je puno više nego kod ostalih lasera). CO<sub>2</sub> laseri imaju mogućnost rada u pulsiranom i kontinuiranom načinu rada. Mogu imati velike izlazne snage, pa se zbog toga koriste za rezanje, bušenje i zavarivanje [8].



Slika 8. Izgled CO<sub>2</sub> lasera [8]

### 3.3. Laser s krutim medijem

#### 3.3.1. Nd:YAG laser

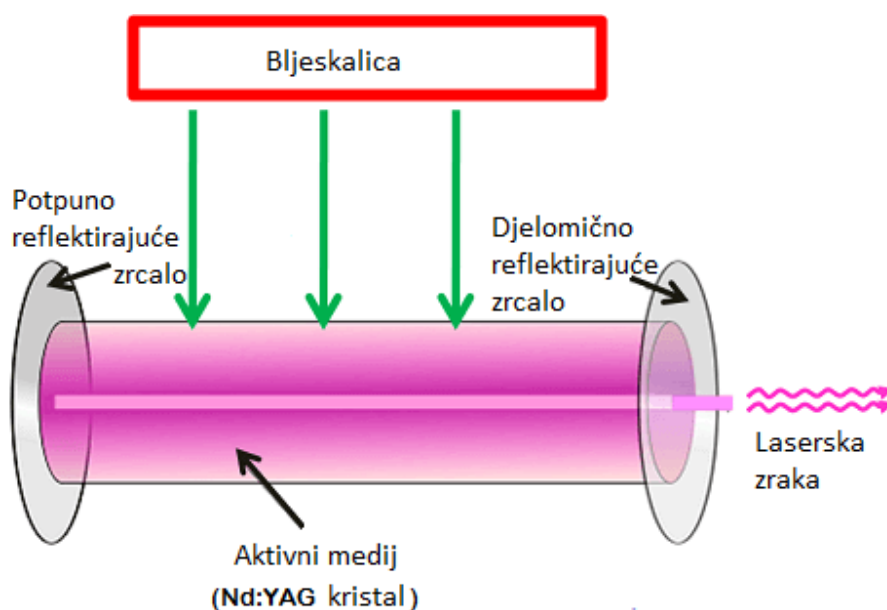
Dok se aktivni medij u plinskim laserima sastoji od atoma, iona i molekula u plinovitom stanju (CO<sub>2</sub> laser), laseri s krutim medijem koriste aktivni medij u obliku kristala. Ovi laseri također rade u pulsiranom i kontinuiranom načinu rada [1].

Nd:YAG laser generira lasersku svjetlost u infracrvenom području spektra, valne duljine 1064 nm. Također emitira lasersku svjetlost na nekoliko različitih valnih duljina uključujući 1440 nm, 1320 nm, 1120 nm i 940 nm. Slika 9 prikazuje tri osnovne komponente svakog Nd:YAG lasera: izvor svjetlosti, aktivni medij i optički rezonator [10].

Izvor svjetlosti dobavlja svjetlost aktivnom mediju kako bi se postigla populacijska inverzija, odnosno stanje u kojem je broj pobuđenih atoma veći od broja nepobuđenih atoma. Kao izvor svjetlosti koriste se bljeskalice ili laserske diode. Bljeskalica je lampa sa električnim lukom, dizajnirana da proizvodi vrlo intenzivnu, nekoherentnu bijelu svjetlost punog spektra vrlo kratkog trajanja. U prošlosti, bljeskalice su većinom korištene kao izvor energije zbog tadašnje niske cijene istih. Međutim, danas su laserske diode poželjne u odnosu na bljeskalice, zbog svoje visoke učinkovitosti i niske cijene [10].

Aktivni medij Nd:YAG lasera sastoji se od sintetičkog kristalnog materijala (Yttrium Aluminium Garnet (Itrij Aluminij Granat)) dopiranog kemijskim elementom neodimijem (Nd). Ioni neodimija nižeg su energetskeg stanja pa bivaju uzbuđeni na veće energetske stanje kako bi se osigurala djelotvorna aktivnost u aktivnom mediju [10].

Optički rezonator Nd:YAG lasera je kristal smješten između dva zrcala. Ta dva zrcala optički su obložena ili posrebrena. Svako zrcalo je posrebreno ili obloženo drugačije. Jedno zrcalo je potpuno posrebreno dok je drugo zrcalo djelomično posrebreno. Zrcalo koje je potpuno posrebreno u potpunosti će reflektirati svjetlost, a zrcalo koje je djelomično posrebreno, reflektirat će najveći dio svjetlosti, a preostala svjetlost će proći kroz zrcalo i tako stvoriti lasersku zraku [10].



Slika 9. Konstrukcija Nd:YAG lasera [10]

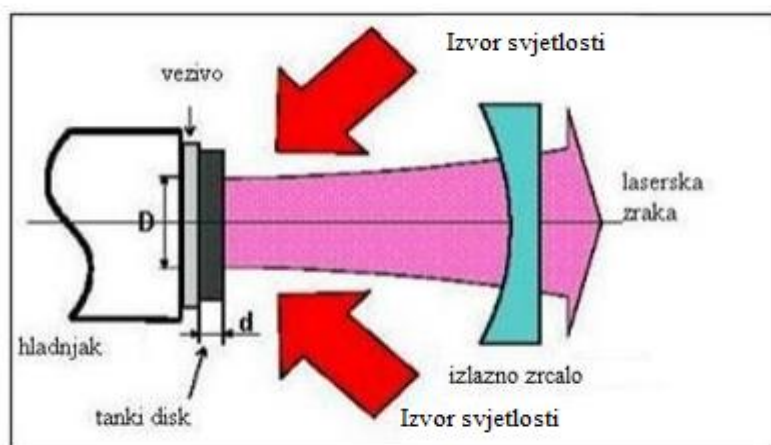
Princip rada Nd:YAG lasera temelji se na četverostupanjskom laserskom sustavu. što znači da su četiri energetska stanja uključena u lasersko djelovanje.

Kada bljeskalica ili laserska dioda opskrbljuje energijom aktivni medij (Nd:YAG kristal), elektroni nižeg energetskeg stanja u neodimijskim ionima dobivaju dovoljno energije i pomiču se u više energetske stanje, sve do najvišeg energetskeg stanja . U višim energetskekim stanjima se zadržavaju jako kratko, nakon čega se vraćaju u početno stanje prilikom čega oslobađaju zračenje u obliku fotona, odnosno dolazi do stimulirane emisije zračenja. Glavni problem koji se pojavljuje je zagrijavanje aktivnog medija pa je potrebno hlađenje. Rashladno sredstvo teče uzduž aktivnog medija i uzrokuje divergentnost laserske zrake, a time i smanjenje kvalitete zrake zbog smanjene dostupne gustoće snage u fokusiranoj laserskoj zraci [10].

### 3.3.2. *Disk laser*

Disk laseri su laseri sa čvrstim aktivnim medijem, koji se obično sastoji od tankog diska napravljenog od itrij-aluminijevog granatnog kristala, toplinskog spremnika, izvora svjetlosti i zrcala (slika 10). Aktivni medij proizvodi lasersku svjetlost na valnoj duljini od 1030 nm, vrlo sličnu valnoj duljini svjetlosti u Nd:YAG laseru. Međutim, postoji velika razlika u obliku kristala koji se koriste u njima [11].

Kako bi se prevladao problem divergiranja laserske zrake kod klasičnih Nd:YAG lasera, razvio se disk laser. U njemu, umjesto kristalne šipke s malim omjerom površine i volumena, kao aktivni medij koristi se vrlo tanki kristalni disk. Disk, debljine od 100 do 200  $\mu\text{m}$  i nekoliko milimetara u promjeru, obložen je na jednom kraju s reflektirajućom površinom koja djeluje kao stražnje zrcalo u laserskom rezonatoru. Vrlo mala debljina diska (time i visoki omjer površine i volumena), njegov dodir s velikim toplinskim spremnikom te činjenica da je promjer izvora svjetlosti koji se koristi za opskrbu kristala energijom mnogo veći od debljine diska, znači da se u konačnici može postići potrebno hlađenje aktivnog medija. Na taj se način divergiranje laserske zrake smanjuje na minimum, čime se povećava kvaliteta zrake [12].



Slika 10. Izgled disk lasera [12]

Osim toga, razina snage izvora svjetlosti (time i razina snage generirane laserske zrake) može se regulirati podešavanjem snage izvora i površine diska koji se osvjetljava. To znači da se laser može koristiti cijelo vrijeme konstantnim intenzitetom bez obzira na razinu snage, što dodatno poboljšava kvalitetu reza. Aksijalna laserska zraka dobivena u disk laseru može imati vrlo visoku kvalitetu izlaznog snopa svjetlosti [11].

Iako mala debljina diska omogućuje vrlo učinkovito hlađenje, to također znači da se samo mali dio generirane svjetlosti pojačava dok prolazi kroz disk. Stoga, kako bi se povećala učinkovitost, svjetlost se reflektira na obloženom stražnjem dijelu diska. Zrcala koja se nalaze oko diska omogućavaju da svjetlost prođe kroz disk mnogo puta (oko 16 puta), čime se povećava intenzitet svjetlosti [11].

Na taj način, iznosi snage do otprilike 1kW mogu se postići koristeći samo jedan disk (uz smanjenu kvalitetu snopa svjetlosti). Za generiranje snage veće od 1 kW može se kombinirati više jedinica diska [11].

Disk laseri imaju puno veću kvalitetu laserske zrake u usporedbi sa Nd:YAG laserom. Neke od prednosti nad Nd:Yag laserom su [11]:

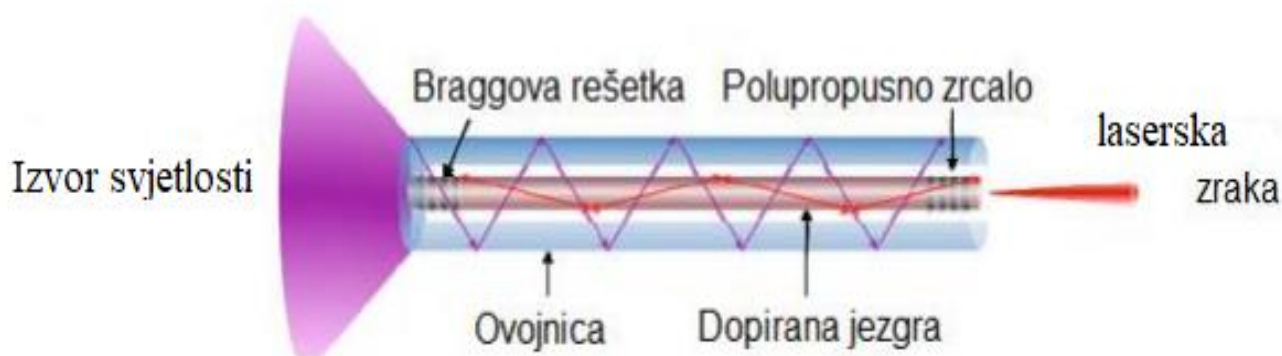
- Za istu izlaznu snagu mogu se upotrijebiti manji promjeri fokusa ("veličine točke") čime se povećava gustoća snage na točki.
- Veće udaljenosti sapnice od radnog materijala mogu se koristiti dobivajući istu veličinu točke te istovremeno ostvarujući veću žarišnu duljinu.

- Za istu udaljenost sapnice od materijala može se koristiti manji promjer leće, smanjujući njihovu težinu i poboljšavajući njihovu dostupnost.
- Potrebna gustoća snage za obradu materijala može se postići pri nižoj laserskoj snazi, čime se smanjuje ukupni ulaz topline.
- Disk laseri nedavno su postali dostupni od nekoliko dobavljača, s razinama snage u rasponu od nekoliko stotina vata do nekoliko kilovata. Takvi visokokvalitetni laseri mogu se koristiti za rezanje, zavarivanje i druge primjene obrade materijala.

### 3.3.3. *Fiber laser*

Fiber laseri su laseri velike snage koji se sastoje od obogaćenih optičkih vlakana i poluvodičkih dioda. Fiber laseri koriste poluvodičke diode kao izvor svjetlosti. Emitirana laserska zraka je sadržana u optičkim vlaknima i putuje kroz fleksibilan kabel. Aktivna vlakna su specijalna optička vlakna izrađena od silicija i germanija te dopirana iterbijem i erbijem [12].

Kako optička vlakna rade na principu totalne refleksije i odlično reflektiraju svjetlost koja se propagira kroz vlakno, postoji mogućnost da se cijeli laserski rezonator napravi od optičke komponente kao što je Braggova rešetka. Braggova rešetka se nalazi direktno u dopiranom optičkom vlaknu i zamjenjuje zrcala tako da propušta određene valne duljine, a druge zaustavlja. Struktura dopiranih optičkih vlakna prikazana je na slici 11 [13,14,15,16].



Slika 11. Prikaz optičkog vlakna fiber lasera [15]

Napretkom tehnologije postiže se jedinstveni i najnapredniji laserski sustav čije karakteristike nadmašuju sve tradicionalne laserske tehnologije uključujući disk laser, Nd:YAG i CO<sub>2</sub> lasere. Fiber laseri odlikuju se kompaktnom veličinom, dugovječnim radom diode, jednostavnim održavanjem, velikim iskorištenjem električne energije i kvalitetnom laserskom zraku bez obzira o kojim se snagama lasera radilo. Fiber laseri dostupni su u rasponu od 20 W do 50 kW s iskorištenjem energije većim od 30 %. Radni raspon lasera je od 10 % do pune snage bez promjene kvalitete laserske zrake, što omogućava puno preciznije rezanje od ostalih izvedbi lasera [12].

Prednosti kod fiber lasera su dugačka i tanka vlakna koja čine odvođenje topline znatno boljim. Valna duljina laserske zrake najčešće iznosi od 1530 do 1620 nm te je dobro apsorbirana od strane metala što omogućava veću kvalitetu reza. Optički medij ima veliki spektar pojačanja, dopuštajući generiranje jako kratkih pulseva i ugađanje valne duljine u rasponu od 400 do 2400 nm. Fiber laser je sustav koji ne koristi zrcala ili optiku za poravnanje i namještanje. To pojednostavljuje integraciju optičkih lasera u proizvodnji medicinskih i drugih laserskih sistema. Fiber laseri poput prikazanog primjera na slici 12 tipično su manji i lakši od tradicionalnih lasera te time zauzimaju manje radnog prostora. Dok konvencionalni laseri mogu biti osjetljivi zbog preciznog poravnanja zrcala, fiber laseri su čvršći te manje osjetljivi na radnu okolinu i uvjete u kojima se koriste [12].



Slika 12. Primjer CNC fiber lasera PE-F300-3015 [7]

## 4. PARAMETRI OBRADE

Parametri obrade kod laserskog rezanja mogu se mijenjati da bi se poboljšala kvaliteta rezanja i da se dobiju tražena svojstva reza. Najvažniji parametri obrade su: posmična brzina, kontinuirani ili impulsni režim rada, snaga lasera, žarišna duljina, položaj žarišta u odnosu na površinu radnog komada i plinovi za rezanje. Međutim, iako su navedeni parametri promjenjivi, većina se automatski odabire u ovisnosti o vrsti i debljini materijala.

### 4.1. Posmična brzina

Energija korištena za lasersko rezanje se dijeli na dva dijela, energiju potrebnu da se napravi rez i gubitke energije u zoni rezanja. Energija korištena za vrijeme rezanja je neovisna o vremenu rezanja, ali energija koja se gubi u zoni rezanja je proporcionalna vremenu potrebnom da se ostvari rez. Stoga, gubitak energije u zoni rezanja se smanjuje povećanjem posmične brzine što direktno utječe na iskoristivost procesa. Razina gubitaka kondukcijom, koji je najznačajniji gubitak u zoni rezanja za većinu metala, značajno raste povećanjem debljine materijala i snižavanjem posmične brzine [6].

Posmična brzina mora biti usklađena s protokom plina za rezanje i snagom. Porastom posmične brzine raste pojava crta na rubu reza dok je s druge strane penetracija jako smanjena. Kod korištenja kisika kao plina za rezanje, male posmične brzine rezultiraju povećanom oksidacijom na rubovima reza što umanjuje kvalitetu reza te povećava zonu utjecaja topline (ZUT). Općenito, posmična brzina je obrnuto proporcionalna debljini materijala. Brzina i snaga moraju biti reducirani kada se režu oštri kutovi kako ne bi došlo do oksidacije. Kako se s najvećom posmičnom brzinom ne može postići dobra kvaliteta reza, definiraju se dvije brzine:

- maksimalna posmična brzina – najveća brzina koja daje rez. Nastali rez je bez srha, ali s povećanom hrapavošću
- optimalna posmična brzina - daje rez bez srha s dobrom hrapavošću,  $v_{opt} \sim 2/3 * v_{max}$

Cilj je dobiti što bolju kvalitetu površine reza sa što većom brzinom rezanja. Stoga se posmične brzine najčešće određuju eksperimentalno [17].

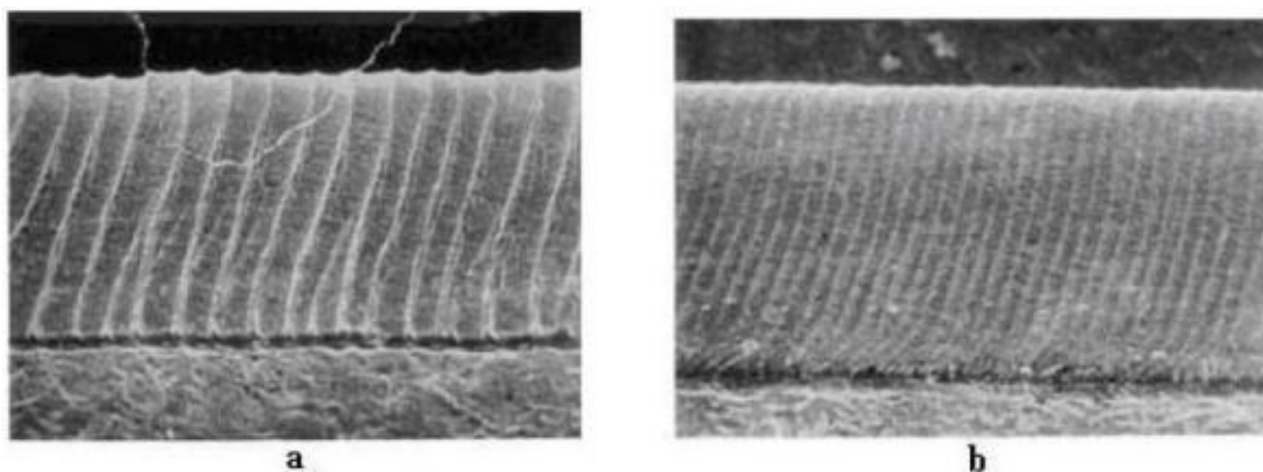


#### 4.2. Kontinuirani ili impulsni režim rada

Visoki intenzitet rezanja moguće je postići s impulsnom i kontinuiranom zrakom. Vršna snaga u impulsnom rezanju ili prosječna snaga u kontinuiranom načinu rada određuju dubinu penetracije zrake u materijal. Laserska zraka kao kontinuirani val visoke snage preferira se kod glatkih, debljih obradaka jer se mogu postići veće posmične brzine s većom prosječnom snagom. Međutim, ispuhivanje taline ili isparenog materijala nije dovoljno učinkovito što se odražava na kvalitetu reza [6].

Impulsne zrake niže energije primjenjuju se za precizna rezanja. Visoka vršna snaga u kratkim intervalima omogućuje potrebno zagrijavanje, dok niža prosječna snaga omogućuje sporije odvijanje procesa te efektivnije ispuhivanje rastaljenog/isparenog materijala uz ostvarivanje bolje kvalitete reza [6].

Usporedba rezova kontinuiranim i pulsnim režimom rada je prikazana na slici 13.



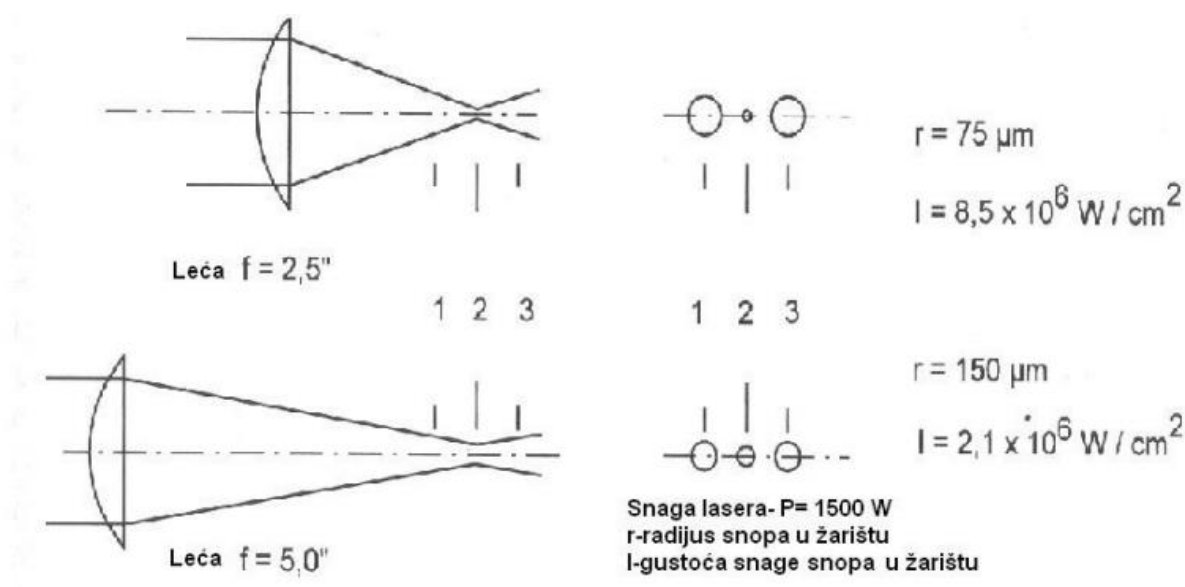
Slika 13. Usporedba reznih površina načinjenih kontinuiranim (a) i impulsnim (b) režimom rada [5]

#### 4.3. Snaga lasera

Snaga lasera mora se podesiti tako da odgovara tipu i debljini obratka. Smanjenje snage je potrebno kako bi se postigla visoka točnost na složenim radnim komadima ili vrlo malim dijelovima. Na primjer, za rezanje ugljičnog čelika debljine 10 mm potreban je laser snage od najmanje 1000 W. Kao i snaga lasera, frekvencija pulsa mora se podudarati s odgovarajućim zadatkom obrade. Na primjer, preporučuje se smanjivanje frekvencije pulsa kod rezanja malih kontura [17].

#### 4.4. Žarišna duljina

Žarišna duljina leće  $f$  definira promjer žarišta. Leća s kraćom žarišnom duljinom fokusira snop na manji promjer žarišta, što daje veću gustoću snage. Na slici 14 prikazana je usporedba leća različitih žarišnih duljina [6].

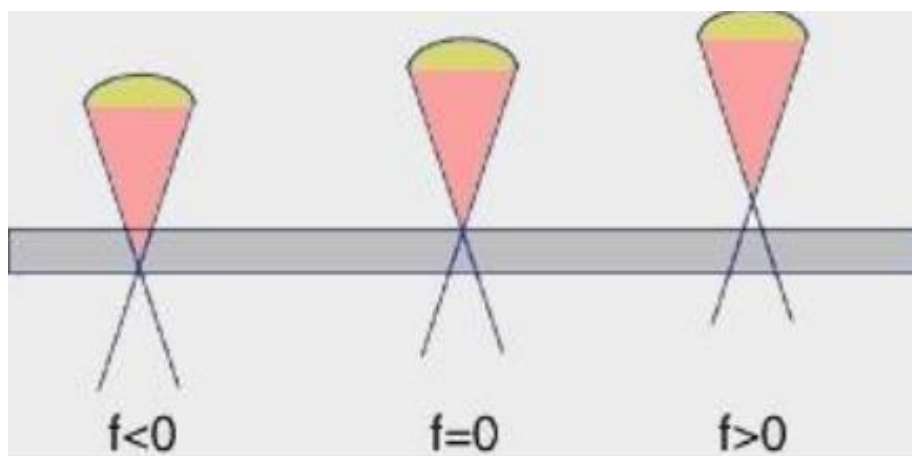


Slika 14. Usporedba leća žarišnih duljina  $f$  od 2,5 i 5 inča (63,5 i 127 mm) [18]

Položaj žarišta i razmak sapnice od radnog komada imaju kod rezanja laserom značajnu ulogu. Svaki pomak od zadane vrijednosti odražava se na kvalitetu reza. Stoga se koriste senzori za kontrolu položaja žarišta, odnosno udaljenosti sapnice od radnog komada. Za rezanje se najčešće upotrebljavaju leće žarišnih duljina 5 i 7,5 inča. Leće sa žarišnom duljinom 5 inča koriste se za rezanje tankih materijala. Za deblji materijal koriste se leće sa žarišnom duljinom 7,5 inča, ali uz manju gustoću snage i posmične brzine naspram leća manje žarišne duljine, gledajući za jednaku snagu lasera u oba slučaja. Odabir leće temelji se na primjeni lasera, odnosno na temelju debljine materijala koji će se u većini slučajeva rezati [6,17].

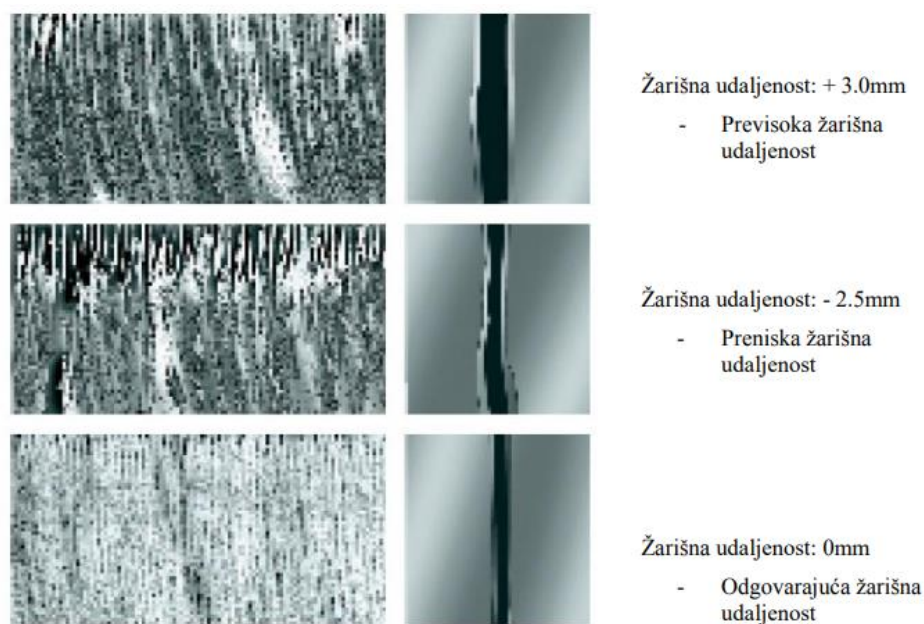
#### 4.5. Položaj žarišta u odnosu na površinu radnog komada

Žarišna udaljenost služi za određivanje pozicije žarišta u materijalu što bitno utječe na kvalitetu rezanja. Žarišna udaljenost mora biti kontrolirana kako bi se osigurala visoka kvaliteta dobivene rezne površine. Svojstva radnog komada također mogu utjecati na promjenu žarišta i varijacije u obliku laserske zrake. Optimalni položaj žarišta kod rezanja s inertnim plinom je kod donje površine materijala, jer se ostvaruje širi rez što olakšava ispuhivanje taline iz zone rezanja. Ako je položaj žarišta pozicioniran previsoko od površine izratka ili previše ispod površine, gustoća zrake padne ispod razine pri kojoj nije moguće rezanje kao što je prikazano na slici 15 [6,17].



Slika 15. Položaj žarišta [17]

Za debljinu obratka do otprilike 6 mm, optimalna žarišna pozicija je na površini obratka. Kod debljine obratka od 8 mm i više, žarišna točka mora biti postavljena iznad njegove površine. U pravilu, položaj fokusa može se postaviti na oko 2/3 debljine obratka. Stoga svaka promjena debljine obratka znači promjenu položaja fokusa [6,17]. Na slici 16 prikazan je utjecaj žarišne udaljenosti na kvalitetu reza.



Slika 16. Utjecaj žarišne udaljenosti na kvalitetu reza [19]

#### 4.6. Tlak i vrsta plina za rezanje

Plinovi za rezanje imaju pet funkcija za vrijeme rezanja. Inertni plin, dušik, ispuhuje rastaljeni materijal ne dopuštajući kapljicama da otvrdnu s donje strane reza (srh), dok aktivni plin, poput kisika, sudjeluje u egzotermnoj reakciji s materijalom. Plin također sprječava da se formira plazma kad se režu deblje sekcije s jakim intenzitetom, te protokom štiti optički sustav lasera od štrcanja. Rub reza se hladi protokom plina što smanjuje ZUT [6].

Izbor plina ima značajan utjecaj na produktivnost i kvalitetu procesa rezanja laserom. Najčešće korišteni plinovi su kisik (aktivni plin) i dušik (inertni plin). Iako dušik nije potpuno inertni plin, najviše se koristi za rezanje inertnim plinom jer je relativno jeftin. Potpuno inertni plinovi, poput argona i helija, uobičajeni su izbor kod rezanja titana jer sprječavaju formiranje oksida i titanovih nitrda [3,6].

Dušik se preferira kod rezanja nehrđajućih čelika, visokolegiranih čelika, aluminija i nikla te mu je potreban veći tlak da može ispuhati rastaljeni materijal iz reza. Kada se koristi dušik pod visokim tlakom, za rezanje nehrđajućeg čelika, dobije se kvalitetan rez bez oksida. Glavni problem kod rezanja s inertnim plinom je formiranje srha s donje strane reza [3,6].

Pravilnim odabirom parametara rezanja se može izbjeći ova pojava. Tlak dušika se kreće od 10 – 20 bar te se tlak povećava s povećanjem debljine materijala. Čistoća dušika treba biti iznad 99.8% [2,3,6].

Kisik se koristi za rezanje mekih i niskolegiranih čelika. Korištenjem kisika se postiže egzotermna reakcija koja doprinosi unosu topline što rezultira većim brzinama rezanja. Tlak kisika za rezanje iznosi 0,5 – 5 bara. Povećanjem debljine materijala potreban je veći tlak kisika da se izbjegne gorenje. Produktivnost rezanja raste korištenjem kisika velike čistoće (99.9%) [2,3,6].

#### **4.7. Izbor i veličina sapnice**

Odabir odgovarajuće sapnice za proces je vrlo važan. Na primjer, s rezanjem pod visokim pritiskom koriste se sapnice s većim otvorom nego za standardno rezanje. Deformacija otvora sapnice može nastupiti nakon sudara sapnice sa obratkom ili obradnim stolom što može dovesti do pogrešaka u rezanju. Općenito, vrste sapnica za određeni stroj i uporabu propisane su u podacima stroja. Ako je sapnica prevelika, povećava se potrošnja plina za rezanje, ali kvaliteta rezanja nije bitno promijenjena. Ako je sapnica premala, rez neće biti čist već će se na donjem dijelu rezne površine pojaviti srh. U krajnjem slučaju materijal se neće u potpunosti izrezati [17].

#### **4.8. Udaljenost sapnice od radnog komada**

Udaljenost sapnice od radnog komada ima veliki utjecaj na kvalitetu reza. Potrebno je na početku optimalno podesiti i duž cijelog reza konstantno održavati razmak između sapnice i radnog komada. Kako bi se postigla ravnomjerna širina reza, potrebno je imati točnu regulaciju udaljenosti sapnice od radnog komada. Regulacija udaljenosti omogućuje da se sapnica nalazi uvijek na istoj udaljenosti od radnog komada, bilo da je radni komad valovit ili da neravno naliježe na radni stol. U početku rezanja se pomoću taktilnog senzora odredi položaj sapnice njenim primicanjem do radnog komada sve dok senzor ne dodirne površinu. Dodirom se zatvara električni krug i računalo prima informaciju da je sapnica postavljena na visinu rezanja [17].

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj ovog eksperimenta je izvršiti analizu utjecaja parametara rezanja poput posmaka i snage lasera na kvalitetu reza na čeličnim limovima debljine od 1 do 5 mm te usporedbom kvalitete dobivene rezne površine doći do zaključka koji parametri daju najbolje rezultate rezanja.

### 5.1. Oprema za lasersko rezanje

Korišteni sustav za rezanje je CO<sub>2</sub> laser „SUPER TURBO-X 48 Mk II“, prikazan je na slici 17, a nalazi se u sklopu tvrtke „Kontal d.o.o.“ u Karlovcu.



Slika 17. „SUPER TURBO-X 48 Mk II“

Tehničke specifikacije navedenog stroja dane su u Tablici 1.

Tablica 1. Specifikacije stroja „SUPER TURBO-X 48 Mk II“

Maksimalna izlazna snaga	1800 W
Raspon kretanja X-Y-Z osi	2685x1270x100 mm
Maksimalna veličina radnog komada	2500x1250x16 mm
Najveća dopuštena nosivost	3.8 kN
Težina stroja	122,5 kN
Model CO <sub>2</sub> lasera	YB-180A 8M
NC jedinica	MAZATROL L32B

## 5.2. Radni materijal

U pokusima je korišten čelik oznake S235JRG1 koji spada u skupinu općih konstrukcijskih čelika za nosive konstrukcije. Opći konstrukcijski čelici općenito su najzastupljeniji u proizvodnji (65 – 80 % mase) [20].

Kemijski sastav i mehanička svojstva ovog čelika dani su u tablicama 2. i 3.

Tablica 2. Kemijski sastav čelika S235JRG1 [21]

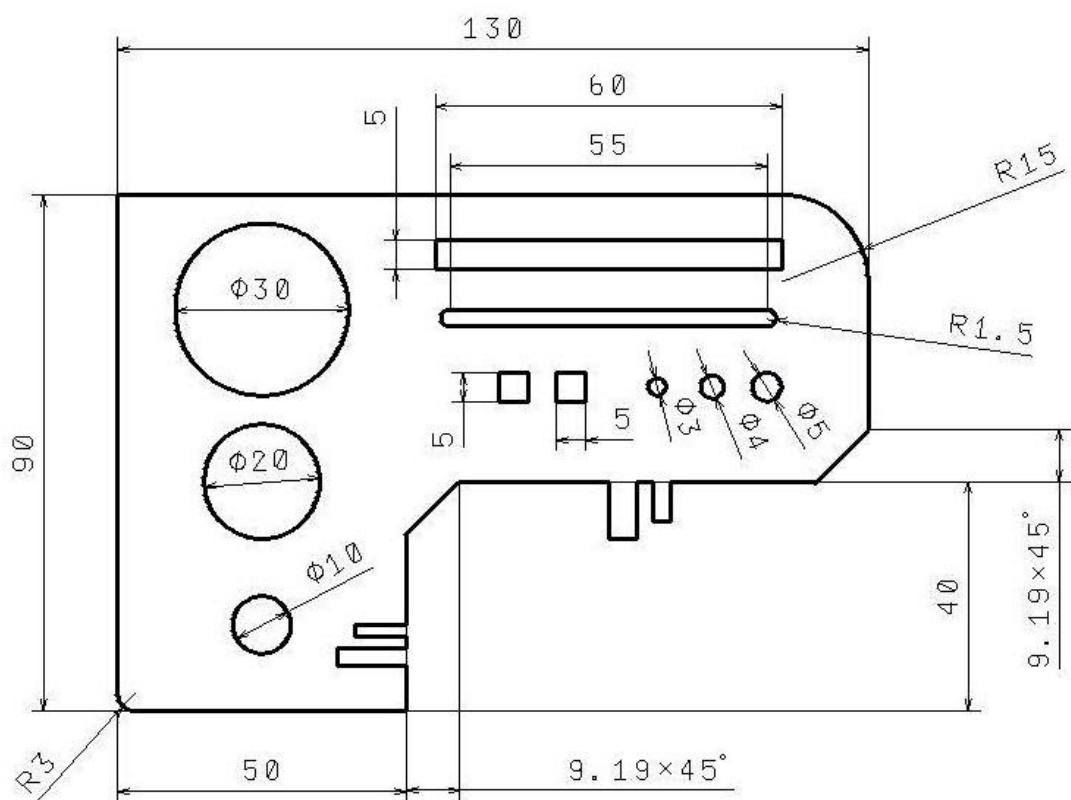
OZNAKA ČELIKA	Kemijski sastav, [%]								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Drugi
S235JRG1	≤0,17	-	≤1,40	≤0,045	≤0,045	-	-	-	N≤0,007

Tablica 3. Mehanička svojstva čelika S235JRG1 [20]

OZNAKA ČELIKA	R <sub>m</sub> , N/mm <sup>2</sup> za debljinu u mm		Re <sub>H</sub> , N/mm <sup>2</sup> za debljinu u mm		A5, [%]
	≤3	3-100	≤16	16-40	min
S235JRG1	360-510	340-470	235	225	21

### 5.3. Plan pokusa

Rezanje se izvodilo na CO<sub>2</sub> laseru kojim su rezani uzorci od čelika S235JRG1 prikazani na slici 18. Rezani su komadi debljine 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm i 5 mm pri pet različitih posmičnih brzina, prilikom čega posmična brzina automatski određuje postotak snage koji će biti korišten pri rezanju. Plin za rezanje korišten u eksperimentu je kisik, a tlak pod kojim je korišten je također mijenjan s obzirom na debljinu materijala. Udaljenost sapnice od radnog komada se mijenjala prilikom promjene posmične brzine od 1 mm do 5 mm. Program u kojem je izrađen uzorak za rezanje je „Sicam“. Uzorak za rezanje prikazan je na slici 18, a plan pokusa prikazan je u narednim tablicama.



Slika 18. Uzorak za rezanje



Tablica 4. Parametri rezanja za čelik debljine 1 mm

Broj pokusa	Posmična brzina, [mm/min]	Snaga, [W]	Tlak plina za rezanje, [bar]	Udaljenost sapnice od radnog komada, [mm]
1	6000	1100	2	1
2	5500	1000	2	2
3	4000	650	1,5	3
4	3000	800	1,5	4
5	1000	500	1,8	5

Tablica 5. Parametri rezanja za čelik debljine 2 mm

Broj pokusa	Posmična brzina, [mm/min]	Snaga, [W]	Tlak plina za rezanje, [bar]	Udaljenost sapnice od radnog komada, [mm]
6	3500	1200	1,2	1
7	3200	1100	1	2
8	2800	1000	1,5	3
9	2500	800	1,5	4
10	1000	500	1,2	5

Tablica 6. Parametri rezanja za čelik debljine 3 mm

Broj pokusa	Posmična brzina, [mm/min]	Snaga, [W]	Tlak plina za rezanje, [bar]	Udaljenost sapnice od radnog komada, [mm]
11	3500	1800	0,4	1
12	3300	1500	0,4	2
13	2500	1100	0,6	3
14	1000	1000	1	4
15	500	800	1,2	5

Tablica 7. Parametri rezanja za čelik debljine 4 mm

Broj pokusa	Posmična brzina, [mm/min]	Snaga, [W]	Tlak plina za rezanje, [bar]	Udaljenost sapnice od radnog komada, [mm]
16	2600	1800	0,6	1
17	2500	1600	0,8	2
18	1500	800	0,4	3
19	1000	1000	0,6	4
20	200	1300	0,6	5






Tablica 8. Parametri rezanja za čelik debljine 5 mm

Broj pokusa	Posmična brzina, [mm/min]	Snaga, [W]	Tlak plina za rezanje, [bar]	Udaljenost sapnice od radnog komada, [mm]
21	2600	1800	0,7	1
22	2000	1600	0,6	2
23	1800	1500	0,8	3
24	1200	1000	0,8	4
25	120	1300	0,5	5

#### 5.4. Rezanje konstrukcijskog čelika S235JRG1 CNC strojem za lasersko rezanje

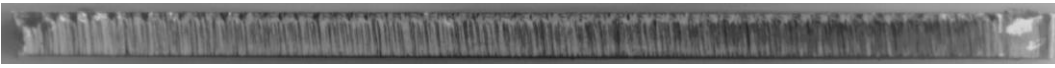
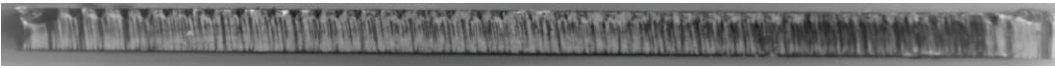
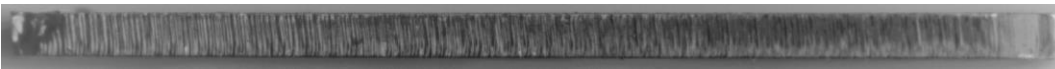

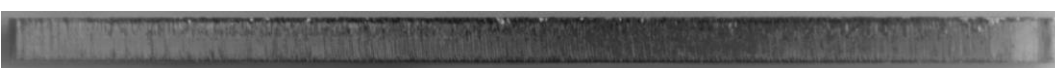
Prilikom rezanja, svi parametri korišteni u eksperimentu doveli su do potpunog rezanja čelika, ali kvaliteta dobivenih reznih površina se razlikuje s obzirom na hrapavost površine, zonu utjecaja topline i količinu nastalog srha. U narednim tablicama, za sve uzorke, prikazan je izgled reznih površina uz parametre pri kojima su dobivene. Na temelju izgleda reznih površina izvršena je analiza utjecaja parametara na kvalitetu reza.

Tablica 9. Prikaz reznih površina čelika debljine 1 mm

Uzorak					
1					
2					
3					
4					
5					
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 4	Uzorak 5
Posmična brzina, [mm/min]	6000	5500	4000	3000	1000
Snaga, [W]	1100	1000	650	800	500

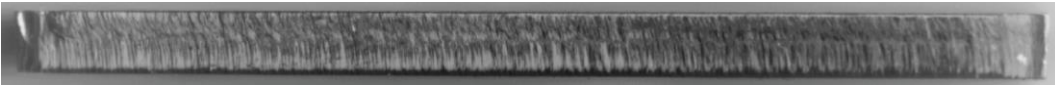
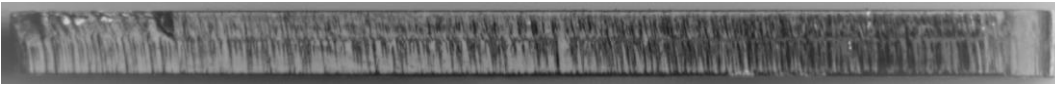
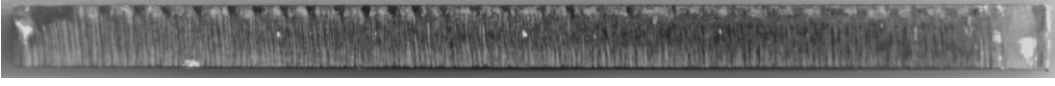

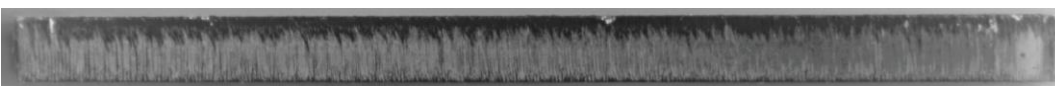
Kod rezanja čelika debljine 1 mm, promjena parametara nema preveliki utjecaj na dobivenu kvalitetu reza s obzirom da se radi o vrlo tankom limu koji se reže bez poteškoća. Unatoč tome, pomoću prikazanih površina može se zaključiti da pri rezanju ove debljine najbolji rez se dobiva pri korištenju parametara za uzorak 5. Za debljinu 1 mm dovoljna je posmična brzina od 1000 mm/min i snaga od 500 W. Korištenje manje posmične brzine i snage dovodi do oksidacije rezne površine i pretjeranog taljenja ruba te površine, a sve to uz nepotrebno povećanje troškova obrade.

Tablica 10. Prikaz reznih površina čelika debljine 2 mm

Uzorak					
6					
7					
8					
9					
10					
	Uzorak 6	Uzorak 7	Uzorak 8	Uzorak 9	Uzorak 10
Posmična brzina, [mm/min ]	3500	3200	2800	2500	1000
Snaga, [W]	1200	1100	1000	800	500


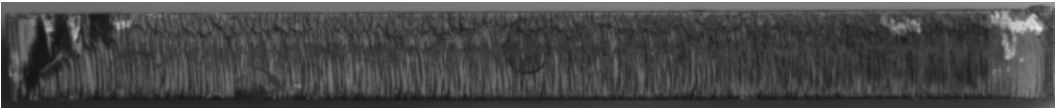
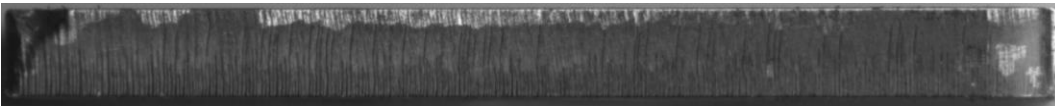
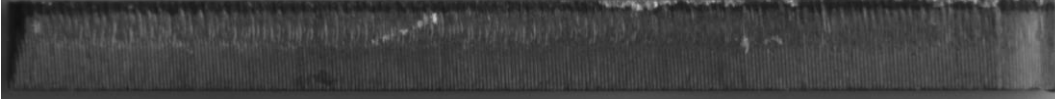

Kod rezanja čelika debljine 2 mm, korištenjem prevelike posmične brzine i snage dobivaju se rezne površine izražene hrapavosti, a gornji i donji rub te površine su oštećeni. Kod uzorka 10 jedini problem su nastala oštećenja na rubovima rezne površine, ali rezna površina nema izraženu hrapavost. Najbolju kvalitetu reza ima uzorak 9, koji je dobiven pri posmičnoj brzini 3000 mm/min i snazi od 800 W. Oštećenja na rubovima su minimalna, a rezna površina je glatka.

Tablica 11. Prikaz reznih površina čelika debljine 3 mm

Uzorak					
11					
12					
13					
14					
15					
	Uzorak 11	Uzorak 12	Uzorak 13	Uzorak 14	Uzorak 15
Posmična brzina, [mm/min ]	3500	3300	2500	1000	500
Snaga, [W]	1800	1500	1100	1000	800

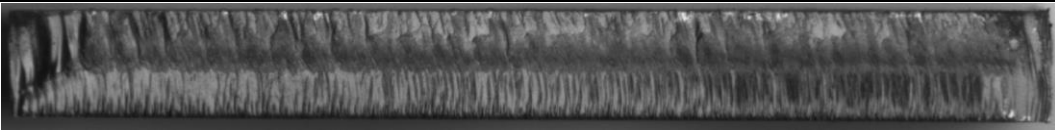

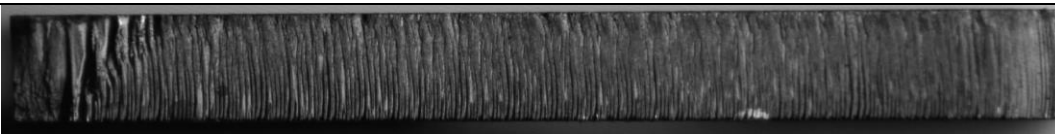
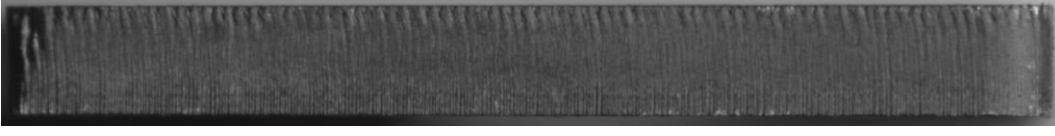
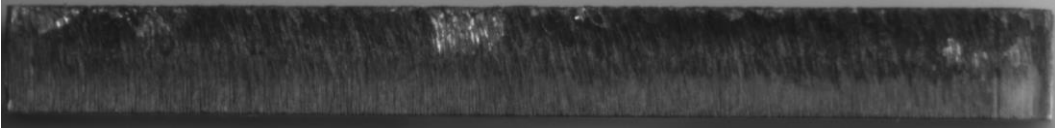
Čelik debljine 3 mm najbolje je rezati posmičnom brzinom 1000 mm/min i snagom od 1000 W čime se dobiva glatka rezna površina, bez nastajanja srha i oštećenja na rubovima. Korištenjem velike posmične brzine i snage kod uzoraka 11, 12 i 13 povećala su se hrapavost i oštećenja na rubovima, a korištenjem premale posmične brzine i snage rub rezne površine oksidira što se vidi po crnoj boji na slici uzorka 15.

Tablica 12. Prikaz reznih površina čelika debljine 4 mm

Uzorak					
16					
17					
18					
19					
20					
	Uzorak 16	Uzorak 17	Uzorak 18	Uzorak 19	Uzorak 20
Posmična brzina, [mm/min ]	2600	2500	1500	1000	200
Snaga, [W]	1800	1600	800	1000	1300

Kod rezanja čelika debljine 4 mm najbolju kvalitetu reza ima uzorak 19 kod kojeg se pojavljuje minimalna oksidacija samo gornjeg reznog ruba, bez velikih oštećenja, a rezna površina je glatka. Povećavanjem snage i posmične brzine povećava se i taljenje na mjestu probijanja, odnosno na mjestu gdje laser počinje rezati. Povećavanjem tih parametara također se povećava i hrapavost površine. Korištenjem premale posmične brzine dolazi do izrazite oksidacije gornjeg reznog ruba.

Tablica 13. Prikaz reznih površina čelika debljine 5 mm

Uzorak					
21					
22					
23					
24					
25					
	Uzorak 21	Uzorak 22	Uzorak 23	Uzorak 24	Uzorak 25
Posmična brzina, [mm/min ]	2600	2000	1800	1200	120
Snaga, [W]	1800	1600	1500	1000	1300

Pri rezanju čelika debljine 5 mm najbolju kvalitetu reza daju parametri korišteni za uzorak 24. Rezna površina je glatka, bez neravnina, nema pojave oksidacije niti oštećenja na rubovima. Povećavanjem posmične brzine i snage povećava se i hrapavost površine, a njihovim smanjivanjem ispod iznosa korištenih za uzorak 24, dolazi do pojave oksidacije i oštećenja na rubovima rezne površine.

## 6. ZAKLJUČAK

Rezanje laserom jedan je od najčešće korištenih postupaka koji se primjenjuju za rezanje različitih vrsta metalnih i nemetalnih materijala. U teoretskom dijelu opisan je proces laserskog rezanja, izvedbe CNC strojeva za lasersko rezanje te parametri obrade koji utječu na kvalitetu dobivenog reza.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je rezanje općeg konstrukcijskog čelika S235JRG1 pomoću CO<sub>2</sub> lasera SUPER TURBO-X 48 u tvrtki Kontal d.o.o. u Karlovcu. Rezani su uzorci debljina 1, 2, 3, 4 i 5 mm. U pokusu je razmatran utjecaj posmične brzine i izlazne snage lasera. Brzina je mijenjana u okviru mogućnosti upravljačkog sustava, s obzirom da u sustavu već postoji 5 unaprijed određenih režima obrade za pripadajuću debljinu materijala koji se obrađuje. Poput posmične brzine, snaga je također određena unaprijed i mijenja se s obzirom na debljinu materijala i odabrani režim rada. U svim pokusima korišten je kisik, čiji se tlak također mijenjao automatski prema odabranom režimu obrade. Udaljenost sapnice od materijala mijenja se u rasponu od 1 do 5 mm.

Na osnovi provedenog eksperimenta moguće je zaključiti da posmična brzina i snaga imaju veliki utjecaj na kvalitetu reza. Kvaliteta reza je također uvelike ovisila o tlaku plina za rezanje i udaljenosti sapnice od materijala. Pri korištenju posmičnih brzina većih od 3000 mm/min i snage veće od 1500 W, dobivena rezna površina je izrazito hrapava, a rubovi oštećeni. Kod posmičnih brzina manjih od 1000 mm/min dolazi do oksidacije rezne površine. Najbolja kvaliteta reza za promatrane debljine materijala dobiva se korištenjem posmične brzine u području od 1000 mm/min do 3000 mm/min, a snaga koja se pritom koristi je između 800 i 1300 W.

Naposljetku se može zaključiti da se pravilnim odabirom parametara obrade može značajno povećati kvaliteta reza, čime se istovremeno smanjuje potreba za naknadnom obradom, što u konačnici dovodi do povećanja efikasnosti i isplativosti rezanja laserom.



## LITERATURA

- [1] Bauer, B.: Doktorski rad, Optimiranje parametara laserskog zavarivanja čelika za poboljšavanje; Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.
- [2] Petring, D: "Laser Cutting", LIA Handbook of Laser Materials Processing, 2001
- [3] Natarajan, R.: "An experimental and theoretical study of heat transfer effects during a laser-cutting process", Iowa, 1990
- [4] <http://www.laser-eng.com/laser-cutting-benefits.html>
- [5] Powell, J.: "CO2 Laser Cutting", 1993
- [6] Ion, J.: "Laser Processing of Engineering materials", 2005.
- [7] <http://www.perfectlaser.net/>
- [8] <https://sciencing.com/co-lasers-work-4899566.html>
- [9] Roфин: Introduction to Industrial Laser Materials Processing; Hamburg, 2006.
- [10] <http://www.physics-and-radio-electronics.com/physics/laser/ndyaglaser.html>
- [11] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-a-disk-laser/>
- [12] Wandera, C.: Diplomski rad, Laser Cutting of Austenitic Stainless Steel with a High Quality Laser Beam; Lappeenranta University of Technology, 2006.
- [13] Bistričić L.: Fizika lasera, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2014.
- [14] Breck C., Hitz C., Ewing J., Hecht J.: Introduction to Laser Technology, IEEE PRESS, New Jersey, 2012.
- [15] Olsen F. O.: Hybrid laser–arc, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2009.
- [16] Laser focus world: <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-48/issue4/features/the-state-of-the-%20art.html>
- [17] <http://www.esabna.com/us/en/education/blog/laser-cutting-process.cfm>
- [18] B. Bauer; Predavanja: Rezanje laserom – EWE tečaj
- [19] Berkmanns, J.; Faerber, M.: "Laser cutting, LASERLINE® Technical", Germany, 2008
- [20] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2002.
- [21] C. W. Wegst: Stahlschlüssel, Marbach, 2007.

## **PRILOZI**

1. CD.R disc